我国 CNGV和 LNGV研究及应用现状

苏 欣, 张 琳, 陈 瑾

(中国石油工程设计有限公司西南分公司, 四川 成都 610017)

摘 要: 随着我国天然气工业和汽车工业的发展以及对环境的要求, 用天然气代替汽油作为汽车燃料成为了发展的必然趋势。介绍了 CNG和 LNG技术, CNG汽车、LNG汽车的系统组成和各自的优越性和缺陷; 综述了我国 CNG汽车和 LNG汽车研究和应用的现状, 对 CNG汽车和 LNG汽车发展及研究提出了建议。

关键词: CNG; LNG; 汽车; 研究; 应用; 现状

文章编号: 1006-5093(2007)03-008-05 文献标识码: A

0 引言

我国能源结构的不合理性是污染大气和破坏环境的罪魁祸首。英国石油公司发布的《2002年世界能源统计年鉴》显示: 中国煤炭消费继 1999 年连续三年下滑后出现巨幅反弹, 2002年较 2001年增长 27.9%, 占中国一次能源消费总量的 66.5%。煤的比重畸高所带来的直接恶果是大气中二氧化碳和烟尘排放量大幅度提高[1]。加之世界范围内石油资源的严重短缺, 用天然气替代煤和石油来减少环境污染和缓解石油资源短缺的压力成为了发展的必然趋势。尤其是在用天然气代替汽油作为汽车燃料成为了研究的新领域和重点。

用天然气作为汽车燃料代替目前广泛使用的汽油的优点是价格便宜、辛烷值高、燃烧充分、低硫、低氮、无灰及减少环境污染, 其在燃烧时排放的 CO、NOx和 CO_2 量较其他矿物燃料明显减少, 并几乎不含 SO_2。例如, 天然气燃烧时所释放的 CO量比汽油减少了 90%左右; 并且天然气发动机的各种操作性能, 如冷启动、耐磨损、易维护等优于汽油发动机。然而众所周知的是天然气与汽油相比, 天然气作为汽车燃料使用的最大缺点是其能量密度太低, 1 L汽油燃烧后可释放 3.48×10^4 kJ的热量, 而常温常压下 1 L天然气完全燃烧释放 40 kJ的热量, 仅为汽油的 0.11%。天然气作汽车燃料对储罐的体积有严格的限制, 所以增加天然气的存储密度, 减少储罐的体积是天然气汽车推广应用的关键[2~3]。

在研究过程中, 提出了三种提高天然气储存密度的方式。第一种方式是通过高压多级压缩增加单位体积的储存密度, 即压缩天然气 (CNG); 第二种方式是液化天然气, 液化后其体积为原来的 1/625, 即液化天然气 (LNG); 第三种就是在储罐中借助装入固体吸附剂, 以达到在较低的储存压力 (3~4 MPa)下使吸附天然气达到与压缩天然气相接近的存储容量, 即吸附天然气 (ANG)。由于第三种 ANGV尚处于研究开发阶段, 还没有大规模的推广应用, 因此, 下面仅对前两种形式的研究情况作一简单介绍。

1 压缩天然气汽车 (CNGV)

生产压缩天然气 (CNG)的工艺流程一般主要有两个工序: 脱水和加压 (使压力达到 20 MPa以上), 不需要脱除 CO_2, 但如果 H_2S含量不符合要求, 需要脱硫。压缩后的天然气储存在高压容器中, 其操作压力在 16.5 ~0.34 MPa之间, 最高可在 20.7 ~0.17 MPa之间, 该压力下其体积比可达 230, 所对应的能量密度约为汽油的 26%[2,4]。

这是目前天然气汽车最主要的储气方式, 据不完全统计, 全世界已有压缩天然气汽车 (CNGV) 12

收稿日期: 2006-06-20

作者简介: 苏 欣 (1982-), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 毕业于西南石油大学油气储运专业, 从事油气田地面工程设计工作。电话: (028)67300830

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

万辆。压缩天然气汽车的优越性已得到社会公认：

a. 经济性。由于天然气燃烧完全，结炭少，减少气阻和爆振，使发动机寿命延长 2～3倍，大修间隔里程延长 2×10^4～2.5×10^4 km，年均降低维修费用 50%以上，减少机油费用，比汽油汽车的机油耗重大大减少，费用降低 50%左右[5]。

b. 安全性。CNG在压缩、储运、减压、燃烧过程都在密闭状态下进行，不易发生泄露，即使发生泄露，在高压下很快在空气中散开，不易着火；天然气着火点为 650～750℃，比汽油高 260℃，爆炸极限为 4.7%～15%，比汽油高出 2.5～4.7倍。不易发生燃烧和爆炸[5]。

但是，CNG本身也有固有的缺陷[2,6～7]：

a. 需要建立专门的高压加气站和配备多级压缩系统，加气站消耗电能很大，造成天然气成本上升，增加了投资和操作费用。

b. 充气时需要昂贵的多级（六级压缩）高压（20～25 MPa）压缩机，能耗大。

c. 储气时要求高压容器为无缝容器，壁厚体重，制造工艺复杂，且高压储气瓶本身重量大影响了汽车载荷和成本。

d. 高压容器制造成本高，对材质要求严格，并需要定期进行检验。

e. 高压设备本身也存在着安全隐患。尽管在大量撞车事故中没有发生过 CNG钢瓶受损破裂的情况，但瓶内压力如此之高，载在车上行驶，毕竟是一种隐患；除有突然外力碰击的可能性外，还常年遭受内、外气液浸蚀而逐渐损裂的可能。如在我国四川省从 1994～1997年就连续发生了八起 9只 CNG钢瓶爆炸事故。

f. 能量密度较低，仅为汽油的 26%左右。

2　液化天然气汽车（LNGV）

液化天然气（Liquefied Natural Gas简称 LNG）是天然气经净化和液化（－162℃）后形成的液化后其体积只有液化前的 1/625，也就是说其汽化为气体后，体积将扩大 625倍。其主要成分是甲烷（75%以上）。相对密度（气体）为 0.60～0.70，液体密度是 430～460 kg/m³，高热值 41.5～45.3 MJ/m³，燃点 650℃，爆炸极限为 5%～15%，压缩系数为 0.74～0.82，其 H_2S含量不超过 4×10^{-6}（f），总含硫不超过 30（气体），N_2含量不超过 1.0%（mol）[8]。

液化天然气汽车（LNGV）是将液化天然气储存在温度为 112 K，压力为 0.1 MPa左右的储存罐内，其密度为标准状态下的 600多倍，体积能量密度约为汽油的 72%，已接近汽油。LNG所含甲烷纯度可达 99%以上，而体积能量密度为压缩天然气（CNG）的两倍多，因而 LNG汽车行程远[6]，而且由于生产工艺的原因，LNG几乎是纯甲烷，不含硫等有害成分，汽车使用相当干净，对环境和汽车发动机都有利。车辆改装 LNG系统主要有以下部分[9]：

a. 低温绝热罐。一般 LNG被储存在－160℃以下，储存压力为 0.13～0.16 MPa。要求储存容器耐低温、耐压，一般为双层金属真空加多层缠绕绝热。国内外都能生产，技术上比较成熟，目前国内技术可保证 LNG日蒸发率在 2%以内（7～14 d之内不产生蒸发损失）。

b. 车用 LNG汽化器。就是利用发动机冷却水做热源，将 LNG汽化的装置。可以由铝合金制造，以减轻重量。

c. 减压调压阀和混和器。减压调压阀的基本原理和性能与 CNG系统相同，就是将汽化器产生的天然气压力（约 0.145 MPa）调压到车用压力（约 0.115 MPa）。CNG由于压力高采用三级调压，LNG采用一级调压就可以了。混合器是一种利用文丘里原理，在静态与动态下均能保证空气/燃料混合气为正确比例的机械装置。

d. 控制装置。根据发动机状况，调节气/汽量。

LNG汽车加气站有两种形式，一种是专门对 LNG汽车加气的单一站，一种是可对 LNG汽车，也可对 CNG汽车的加气的 L-CNG站。对于后者就是前者外加一套 LNG转化 CNG流程。

LNG比 CNG具有下列优势：杂质少、纯度高、精纯的 LNG可以使发动机性能充分发挥，且使排放更加洁净；储备里程长（是后者 3倍）；常压低温绝热储存，比高压储存的容器要求低，相对于 CNG的高压钢瓶，重量降低很多；LNG常压使用，防撞、抗爆性好，运输安全；由于燃料储箱体积小，重量轻，相应提高了汽车装载利用率，汽车运输储备里程大，燃料供给系统的成本也相对低，可降低运输成本，特别适合于中长途的客车运输[9]。

但是液化天然气存在以下问题，使其至今无法推广[2,6]：

a. LNG工厂燃料站建设投资巨大，液化天然气加气站技术难度大，投资高，使得其经济性差。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

b. 天然气液化临界压力高，临界温度又低，液化成本太高。

c. 液化天然气在存储和运输过程中需要不断降温，以维持液化状态。

d. 液化天然气在车辆内存储和行驶过程中使用，需要另外增加热汽化装置，技术难度大且无法回收冷量。

e. LNG贮气瓶在绝热保温较好时仍有 0.12%～2%的蒸发损失，使用过程中维护保养困难。

3 CNGV、LNGV研究及应用现状

3.1 CNGV研究及应用现状

我国 20世纪 50年代开始试用天然气汽车。当时由四川重庆市率先使用低压气囊供气代替汽油。四川石油系统率先从前苏联引进一套 CNG加气装置，在四川泸州市建设了一座 CNG加气站，并安排 20辆汽车改装为天然气汽车作试验。1988年四川石油管理局从新西兰引进 CNG加气装置和 50辆天然气汽车改装部件。在四川南充市兴建了 CNG加气站，有力地推进了我国天然气汽车的发展工作，加快了四川和全国天然气汽车产业的启动[10～13]。截止 2001年底，我国共建 CNG加气站 250座，已改 CNG汽车近 50 000辆。目前四川省是我国 CNG加气站和 CNG汽车发展最好的省份，到 2001年底，已建 CNG站 120座，已有 CNG汽车 34 300辆。目前我国 CNG产业发展较快的地区主要集中在天然气气田周边省份，如川渝地区、河南和新疆；或是天然气管道经过的城市，如北京、天津等，全国已有 CNG汽车共计约 45 430辆[13]。

目前 CNG汽车主要是对已定型的汽油车进行改装，保留原来供油系统不变，增加一套用作压缩天然气储备、供给和控制的“车用燃气装置”，将单一燃料汽油车改装成具有燃油、燃气双重功能的 CNG汽车。“车用燃气装置”主要由储备、供给和控制三大系统组成。储备系统主要由充气阀、高压截止阀、天然气储气瓶、高压管线、压力传感器及气量显示器等组成；供给系统主要由天然气滤清器、减压调节器、动力调节器、混合器等组成；控制系统主要由油气燃料转换开关、天然气电磁阀、汽油电磁阀等组成[11]。

其中天然气储气瓶是 CNG汽车的一个主要部件，也是历来研究的重点。天然气储气瓶从最初的钢质气瓶发展到今天的钢质内衬缠绕 CNG气瓶、铝合金内衬缠绕 CNG气瓶以及全塑复合材料 CNG气瓶。缠绕 CNG气瓶同钢质气瓶比较容重比有了很大的提高。目前储气瓶多采用普通钢或同类高强度合金结构钢制造，重量重。为减轻车辆无效载重，可考虑通过优化确定燃料添加周期（如按当地同类用气车辆平均日行里程数量确定）、气瓶储气压力、储气容积并综合考虑加气站的合理设置等原因加以缓解。为从根本上解决高压储气瓶所带来的车辆空间利用率低以及无效载重过大等问题，国外作了大量探索。储气瓶形状的优化在兼顾改善容器受力情况，减小容器壁厚，减轻重量的同时，旨在充分、合理利用车辆有限空间；储气瓶材质的改良（如铝合金复合材料、炭素材料等的研究及应用）则在解决钢瓶内外壁腐蚀等潜在危险因素的同时，亦为减轻储气容器重量，更好地满足使用要求。

CNG汽车燃料供给系统除燃料储存装置（储气瓶）及发动机外，主要包括：加气边接装置、气流控制阀压测定及显示装置、调压装置、空气混合装置、安全保护装置以及燃料输送及连接管件等，对于两用燃料汽车设有燃料转换装置。NGY燃料的供应系统装置除反应灵敏、安全可靠外，还应满足体积小、重量轻、安装使用维护方便等要求。作为系统中的关键设备调压器及混合器，国内已研制成功并且摸索出一整套匹配参数[12]。

目前国内以两用燃料 CNG汽车为主，多数是对在用车进行改装，技术水平处于国外第一阶段。由传统发动机改装而来的天然气发动机，功率和扭矩比原有的下降大约 10%以上，还存在油气切换装置来源多品种杂，改装配件匹配工作欠缺等问题。两用型 CNG汽车发展趋是由改造在用车向整车厂生产新车过渡。一汽、东风等一些大型汽车发动机厂正在研制单燃料天然气发动机，北京、上海分别从美国、德国进口单燃料天然气发动机由整车厂生产新车。单燃料天然气发动机压缩比可达 12以上，充分发挥天然气抗爆性的特性，从而使车辆的动力性和经济性明显提高，同时延长发动机寿命，节约维修费用，这是 CNG汽车发展的方向。另外加气站的建设和布局也是影响 CNG汽车的发展因素，CNG加气站是集化工、机械、自动控制、高压气体流量计量、防爆降噪等技术于一体的高度集成化的机电一体化产品，其关键设备是橇装式压缩机站和计算机控制加气机，辅助设备有天然气净化设备和储气系统。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

多年来 CNG汽车和加气站技术日趋成熟,国产化进程加快。先进的电子技术和机械制造技术使 CNG汽车的安全性和控制性得到保证,天然气汽车瓶重减轻,加气站体积减少,加气速度可实现与加注汽油一样,通过合资、合作、攻关等对引进技术设备进行消化、吸收创新,在气瓶、减压调节器、站用压缩机、售气机等方面正在逐步实现国产化,产品的技术和质量已达国际先进水平,并且 CNG汽车改装技术和操作人员技术培训方面也得到了长足的发展。但总体讲,我国 CNG汽车以及配套的加气站发展还处在初级阶段,主要设备依靠进口、价格昂贵和售后服务等问题已成为发展天然气汽车的制约因素。国家有关部门正在把 CNG汽车及配套加气站设备国产化列入项目攻关课题。近几年来,北京、上海、成都、重庆、南京等地从事橇装式 CNG加气站设备集成关键技术研究及压缩机加气机国产化工作已取得一定的进展,建议尽快出台 CNG汽车产业发展政策,促进国产化的实现[14]。

3.2　LNGV研究及应用现状

我国 LNG汽车尚处于实验阶段,仍有一些技术问题需要开发研究,特别是天然气液化和储存技术,目前国内有几家正在研制汽车的 LNG装置。吉林油田与中国科学院低温实验中心合作研制了一套 500 L/h的 LNG装置。中科院低温实验中心与绵阳燃气集团公司合作研制了 LNG—20型装置和一套 300 L/h的 LNG装置,并开始使用,绵阳第一辆 LNGV已经行驶 4 000 km以上,第二辆已经行驶 2 000 km以上,情况良好。1990年开封市内有 3辆 LNGV,已经行驶 4 000 km[15]。

北京市公交总公司从 2001年就开始与首科中原公司(首科集团、中原油田)合作建设北京市 LNG科技示范工程,包括组建一个规模为 50辆 LNG公共汽车的示范车队,并配套建设一座 LNG科技示范站。目前,北京市公交总公司已拥有 11辆 LNG公共汽车。其中 10辆 11 m单机车,1辆 14 m铰接车。车辆由所属的北京京华客车有限责任公司研制生产,两种车型均选用 CHART公司 410 L的 LNG储罐 1只,可贮存 240 m³的天然气。2003年最先投入使用的 1辆单机样车现已运行 12×10^4 km,14 m样车已行驶近 8×10^4 km,其余车辆于 2004年 2月投入使用,平均每车行驶近 4×10^4 km。截止到 2004年 7月 LNG车辆的总行驶里程已近 60×10^4 km。2002年 11月,LNG科技示范站在公交 315路总站建成并投入试运行,成为国内首座车用 LNG加注站。该示范站设备选用美国 CHART公司产品,站内设有一座总容量为 50 m³的 LNG立式罐。日加气能力为 1.2×10^4 m³,最多可满足 100辆 LNG公交车的加气需求[15~18]。

随着研究的深入,制约 LNG汽车市场的"瓶颈"将相继被突破。LNG用于汽车燃料的弱点是低温 −162℃储存,不宜长时间存放。现在已开发出了能使其存放时间较长的车载燃气系统,经试验,这种车载燃气系统能维持 LNG低温状态下存放 7 d,只要把 LNG汽车发展最理想的对象锁定在公交车、出租车上,就可扬长避短,克服 LNG低温储存时间短的缺陷,突破不易低温储存的"瓶颈";LNG汽车改装燃气系统成本费用较高。中原油田绿能高科公司与张家港联合开发一种功能比较完善、技术比较成熟的 LNG汽车燃气系统,据测算,一套大车燃气系统的价格约为 1.5万元,较进口的便宜 2/3~1/3,一套小车的价格约需 1万元,考虑市场的成熟和扩大,其价格将会大幅度下降[19]。

同时 LNG冷量利用的研究也提上了研究日程。上海交通大学与上海申沃客车有限公司等单位合作对液化天然气供气系统中的燃料等关键部件进行了研究,并对所选用燃料储罐、供气管路等部件在 Cummins CG—250发动机试验台架上进行了试验研究,在此基础上,开发了 SWB6115 LQ—3型液化天然气公交车,而且样车的动力性能和排放指标经测试能够满足公交车使用要求[9]。同时杨鹏等通过"火用"分析方法,研究了现在 LNGV的"火用"损失,提出了车用 LNG冷量利用两种方式:动力利用和制冷利用。但是由于冷量动力利用涉及大量的技术(安全技术、低温泵技术、绝热技术、透平机技术、负荷匹配技术、换热技术等)和高昂的使用代价(包括购置费、使用中的劳动强度、维修费、使用延长寿命长短及占据空间等),所以动力利用不可能马上实现;而制冷利用一般来说有两种用途,一是用作车厢降温(一般采用盐水作为载冷剂);二是用于运输物资的冷藏(采用二氧化碳、乙二醇等作为载冷剂)。制冷利用作为一种简单的冷量利用方式,具有强大的竞争力,应该大力普及[18]。

4　建议

CNG汽车和 LNG汽车都是清洁汽车,两者各有

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

优点和不足，随着我国天然气工业的发展两者都将得到长足的发展，在发展过程中需要注意：

a. CNG汽车当前研究的主要课题之一就是要提高气瓶的安全性和寻求安全可靠的气瓶材料。对于钢质气瓶，要求钢的纯净度好，韧性高，延伸性能好，钢的表面质量好。如果选用的钢断裂韧性很高，临界裂纹尺寸大于壁厚，使用中，即使发生裂纹扩展，裂纹穿透壁厚仍达不到临界裂纹尺寸，只会发生泄露而不会发生因裂纹达到临界尺寸引起的爆炸，即“只漏不爆”。因此气瓶制造厂不单对钢厂提出用于钢质气瓶的钢号和相应制造、验收技术标准要求，而且还应对钢中有害杂质元素（如 S、P、O）含量、钢的表面质量和力学性能指标提出严格控制要求[20]。

b. 在推广 CNG汽车的进程中，需要政府等多方出台鼓励和支持政策，加大力度作好宣传；作到 CNG汽车和 CNG加气站同步发展，加气站可适当超前；完善加气站施工规范；同时发展 CNG汽车和 CNG加气站要量力而行，要充分估计本地区经济承受能力、城市管网建设速度力和汽车保有量；加气站规划和建设要以管网为依托，不要贪大和多[21]。

c. 我国现在已经和即将建设的 LNG工厂和沿海 LNG接收站为推广 LNG汽车提供了有力的支持。LNG汽车不仅能够满足严格的车辆排放法规的要求，更重要的是克服了 CNG汽车的主要缺点，兼有 CNG汽车及 LPG汽车的优点，能够满足长途运输的需要，更具有实用性。国外 LNG技术基本已没有技术难点，已经达到实用技术水平，但价格昂贵，无法在国内推广使用，但是我们可以借助国外成熟的 LNG汽车技术和设备，依靠国内低温行业的技术力量完全可以解决技术难题，使国内 LNG汽车技术达到实用水平。

d. 由于 LNGV的发展不是单方面的，它是一个系统的复杂工程，需要各方面协调、鼓励、支持。国家要制定相关政策和法规，推进 LNGV的应用；加大对关键技术的攻关力度，实现关键技术国产化，降低 LNGV的生产成本；加快制定 LNGV相关标准规范，使得 LNGV生产统一化、规模化（目前我国正在拟定的 LNGV相关标准和规范有《液化天然气汽车定型试验规程》、《液化天然气汽车燃料系统技术条件》、《液化天然气汽车燃料系统安装要求》等）。相信在不久的将来，随着我国沿海 LNG工厂的建成，LNGV将迎来它发展的春天[22]。

参考文献：

[1] 苏 欣，袁宗明．我国煤油气消费比例预测分析及对策[J]．天然气勘探与开发，2005，28(2)：63-66.

[2] 邢 伟，阎子峰，丁荣刚．吸附天然气技术[J]．天然气化工，2000，25(4)：43-47.

[3] 廖志敏，蒋 洪．吸附天然气技术及其应用[J]．油气储运，2005，24(4)：19-22.

[4] 徐文渊．液化石油气（LPG）、压缩天然气（CNG）、液化天然气（LNG）作汽车燃料的现状和发展[J]．石油与天然气化工，1995，24(3)：163-166.

[5] 伍永乔．发展压缩天然气汽车势在必行[J]．天然气工业，1995，14(5)：81.

[6] 刘保华，李家俊，赵乃勤．天然气用做汽车替代性燃料的储气方式研究[J]．炭素，2002，(4)：39-42.

[7] 庄永茂，闻 望．车用天然气吸附储存的研究[J]．煤气与热力，1997，17(4)：19-21.

[8] 苏 欣，熊 波，黄 坤，等．松潘县液化天然气（LNG）气化工程[J]．石油与天然气化工，2005，34(4)：248-250.

[9] 武 斌，张秀丽．LNG汽车和 LNG汽车加气站[J]．油气田地面工程，2003，22(4)：81.

[10] 林越玲，赵水根．绿色汽车在深圳市的发展展望[J]．城市燃气，2005，(5)：8-11.

[11] 彭建萍．浅析 CNG汽车技术应用前景[J]．石油与天然气化工，2004，33(6)：403-404.

[12] 彭峻岭，高 峰．浅谈车用天然气技术的推广[J]．黑龙江交通科技，2004，(8)：65-66.

[13] 王 莉．浅谈我国 CNG加气站和 CNG汽车的发展[J]．石油规划设计，2003，14(5)：4-5.

[14] 陈基杰，孙 芃．天然气汽车的现状及发展趋势[J]．城市燃气，2003，17(6)：30-32.

[15] 郝利军，葛蕴珊，张付军，等．液化天然气汽车[J]．世界汽车，1999，(3)：13，31.

[16] 阎炳耀．浅析 LNG在城市公共汽车上的应用[J]．城市公共交通，2005，(1)：19-21.

[17] 胡军军，张武高，黄 震，等．液化天然气公交车应用研究[J]．天然气工业，2004，24(7)：96-97，101.

[18] 杨 鹏，杜玉清，石玉美．液化天然气汽车 LNG冷量利用方式探讨[J]．天然气工业，2004，24(7)：98-101.

[19] 余传发．实现液化和压缩天然气大发展[J]．中国石化，2003，(3)：20-22.

[20] 辛中仁．压缩天然气钢瓶爆炸事故分析[J]．天然气工业，1998，18(2)：75-78.

[21] 周淑慧，高 峰．国内外天然气汽车和加气站的发展现状及在我国的发展前景（二）[J]．中国能源，2002，(12)：27-30.

[22] 苏 欣，杨 君，袁宗明，等．我国液化天然气汽车研究现状[J]．天然气工业，2006，26(8)：145-148.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net